

# **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN INVERSOR ACÚSTICO COMO APOYO DIDÁCTICO EN LA ENSEÑANZA DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA**

*DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN ACOUSTIC INVERTER AS  
DIDACTIC SUPPORT IN THE TEACHING OF POWER  
ELECTRONICS*

**Carlos Antonio Gómez Saavedra**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México  
*cags.dcm@gmail.com*

**Adolfo Rafael López Núñez**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México  
*adolfo.lopez@itesi.edu.mx*

**Héctor Osiel Valdez Carrera**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México  
*hosielvc@gmail.com*

**Diana Cecilia Valdés Delgado**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México  
*dianavd@gmail.com*

**José Juan Alfaro Rodríguez**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México  
*joalfaro@itesi.edu.mx*

**Recepción:** 14/septiembre/2019

**Aceptación:** 29/octubre/2019

## **Resumen**

Actualmente los sistemas de conversión de corriente directa a corriente alternan, (denominados comúnmente inversores u onduladores) han tenido una relevancia importante, esto debido a las aplicaciones que se le está dando en sistemas eólicos, fotovoltaicos y automóviles eléctricos, por mencionar solo algunos. Debido a lo anterior, resulta indispensable que los alumnos de las ingenierías mecatrónica y electrónica comprendan cada una de las etapas que conforman un inversor. Este artículo muestra el diseño e implementación de un inversor que sirva de apoyo en las materias de “electrónica de potencia aplicada” y de “electrónica de potencia” que se imparten a los alumnos de las ingenierías mecatrónica y electrónica

respectivamente; cabe resaltar que, con el fin de hacerlo llamativo para el estudiante, el inversor es acústico, siendo capaz de generar tres notas del sistema temperado (C, D y E en la cuarta octava), las cuales se pueden escuchar por medio de una bocina en la salida de dicho inversor.

**Palabra(s) Clave:** Electrónica de potencia, Inversor, sistema de conversión.

## **Abstract**

*Currently, the direct to alternate current conversion systems, (commonly called inverters) have had an important relevance due to the applications that it is being given in wind systems, photovoltaic and electric cars, to mention just a few. Due to the above, it is essential that the students of the mechatronics and electronics engineering understand each of the stages that conform an inverter.*

*This paper shows the design and implementation of an inverter that serves as educational support in the subjects of “applied power electronics” and “power electronics” that are taught to students of mechatronics and electronics engineering respectively; It should be noted that, in order to make it attractive for the student, the inverter is acoustic, being able to generate three notes of tempered system (C, D, and E in the fourth octave), which can be heard through a speaker in the output of the inverter.*

**Keywords:** *Conversion system, inverter, power electronics.*

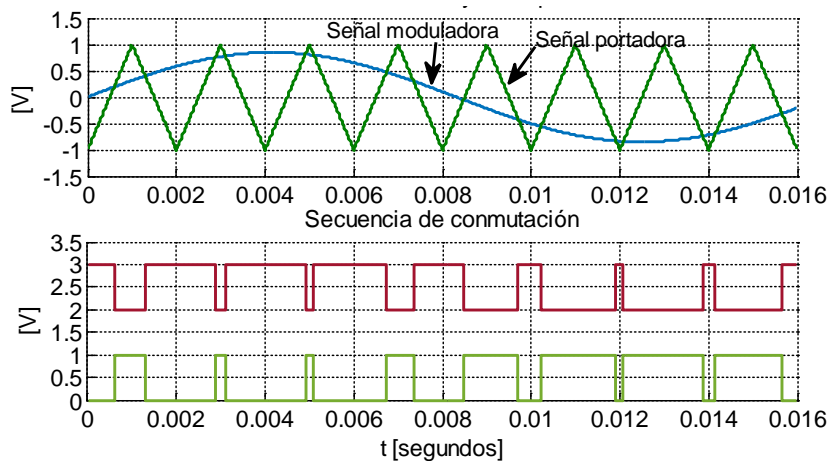
## **1. Introducción**

Un inversor es un dispositivo que convierte el voltaje de entrada en CD (corriente directa) a un voltaje de salida en CA (corriente alterna), con la frecuencia y magnitud deseadas. El funcionamiento de estos inversores basa su funcionamiento en la conmutación sincronizada de interruptores unidireccionales, tales como los BJTs, MOSFETs o IGBTs. El uso de los inversores es común en aplicaciones industriales tales como la propulsión de motores de CA de velocidad variable, la calefacción por inducción, las fuentes de respaldo y las de poder, entre otras [Rashid, 2004].

Buscando que el contenido armónico de los voltajes de salida sea pequeño, se han desarrollado diferentes estrategias conmutación en inversores monofásicos, tales

como modulación de pulso trapezoidal, modulación por conmutar (UPWM), modulación inyección de armónicas, modulación sinusoidal de ancho de pulso (SPWM), etc. De las cuales la técnica más utilizada es SPWM [Rashid, 2004], [N. Mohan, 2002], [D.W. Hart, 2001].

Dependiendo de la topología del inversor monofásico a implementar, se debe realizar una correcta conmutación de 2 o 4 interruptores (medio puente y puente completo respectivamente) para generar una onda sinusoidal a la salida. El patrón de conmutación a utilizar se obtiene mediante la comparación de una señal triangular de frecuencia y magnitud fija (señal portadora), con una señal sinusoidal de magnitud y frecuencia variable (señal moduladora), esta modulación comúnmente se conoce como modulación bipolar. En la figura 1 se muestra la modulación bipolar mostrando las señales portadora y moduladora, además la secuencia de conmutación para los interruptores. Debido a la importancia de la enseñanza en el aula de este tipo de convertidor, este trabajo describe el desarrollo de un inversor monofásico bipolar medio puente, explicando a detalle cada una de las fases del diseño y mostrando la implementación experimental.



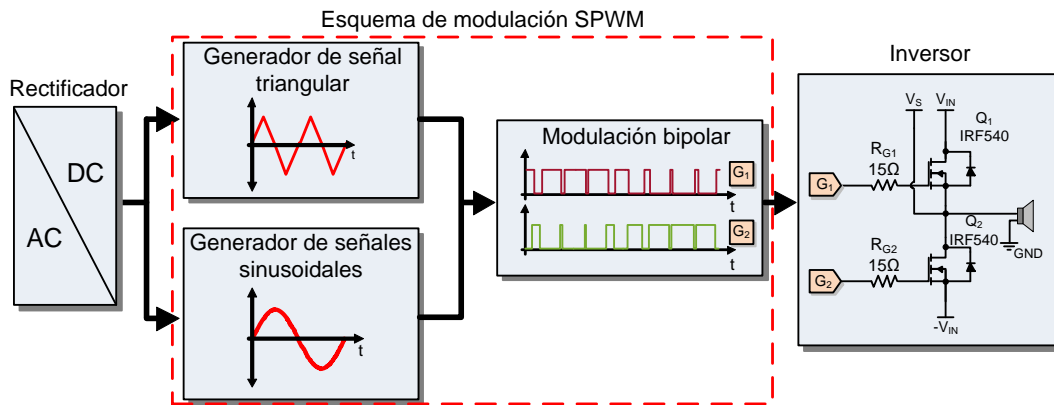
Fuente: Elaboración propia.

Figura 1 Señal moduladora, portadora y secuencia de conmutación para los interruptores.

Cabe destacar que con el fin de hacer más llamativo el aprendizaje de este convertidor, el sistema se diseñó pensando en que fuera acústico, es decir, el sistema es capaz de generar tres tonos distintos, C (do), D (re) y E (mi) en la cuarta octava, los cuales se pueden percibir mediante una bocina conectada a la salida.

## 2. Métodos

En esta sección se describe el diseño y construcción de las etapas que conforman el inversor acústico. Este sistema tiene tres etapas principales las cuales son: rectificador, implementación del esquema SPWM y el inversor de medio puente. Para lograr escuchar tres diferentes notas se implementaron tres tarjetas generadoras de señal sinusoidal para cada frecuencia. En la figura 2 se muestra un diagrama general del sistema.

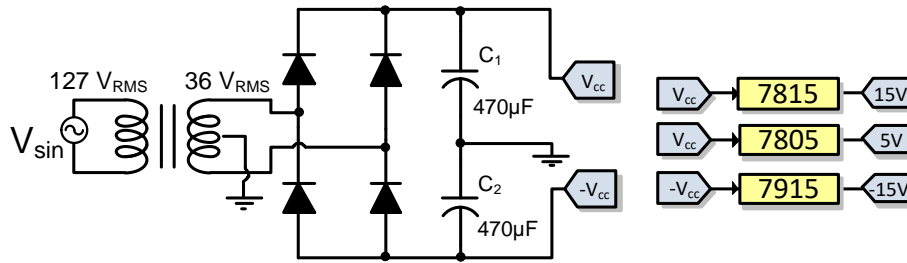


Fuente: Elaboración propia.

Figura 2 Diagrama general del inversor acústico.

### Rectificador

El propósito de un rectificador es el de generar una tensión de corriente directa (CD) para alimentar a los circuitos integrados de las etapas posteriores, esto se realiza a partir de una tensión de corriente alterna (CA). Este voltaje de CD debe estar libre de ondulaciones o rizados, para lo cual se conecta un capacitor como filtro del lado de CD [N. Mohan, 2002]. Existen diversas topologías de convertidores, en este caso se implementó un rectificador no controlado mediante rectificadores con diodos. Se diseñó el rectificador de modo que a su salida se obtuvieran los siguientes voltajes: 5, 15,  $-15$  y  $36\text{ V}$ ; esto debido a que son los voltajes que se utilizan para alimentar los circuitos integrados de las etapas posteriores. La figura 3 muestra el diagrama del rectificador implementado, el cual se alimentó mediante un transformador con derivación central de  $36V_{rms}$ , además se utilizaron los integrados LM7815, LM7805 y LM7915 para la regulación del voltaje.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3 Diagrama eléctrico del rectificador implementado.

En la figura 4 se muestra el rectificador implementado en una PCB.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4 Rectificador implementado.

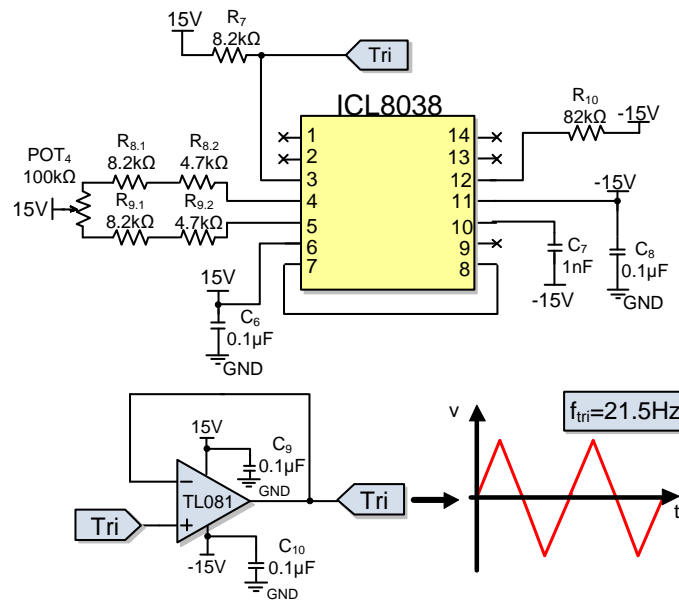
### Implementación del esquema SPWM

La modulación que se utilizó fue la modulación bipolar, que consta de dos señales, una señal triangular de alta frecuencia, comúnmente llamada señal portadora y una señal sinusoidal a baja frecuencia de amplitud menor a la señal portadora, comúnmente llamada señal moduladora. Estas dos señales son comparadas mediante un amplificador operacional, obteniendo a la salida un tren de pulsos. Con la secuencia de pulsos es posible obtener su complemento mediante una compuerta NOT, de esta manera se logra obtener dos secuencias de pulsos complementarios para controlar el encendido y apagado de los semiconductores.

### Generador de onda triangular

La señal triangular se diseñó mediante el integrado ICL8038 a una frecuencia de 21.5 kHz y con una amplitud de  $\pm 5 V$ , se fijó a esta frecuencia con el objetivo de obtener el contenido armónico a una frecuencia no audible para el ser humano y,

de esta manera eliminar la necesidad de utilizar un filtro en la salida, logrando escuchar una nota más limpia. La figura 5 muestra el diagrama electrónico en donde se detallan los componentes utilizados. Para la correcta generación de la señal portadora fue necesario utilizar un amplificador operacional TL081 configurado como seguidor, el cual se colocó para evitar una demanda excesiva de corriente al integrado ICL8038.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5 Diagrama electrónico del generador de onda triangular.

El circuito de figura 5, fue probado en protoboard para asegurar su correcto funcionamiento, posteriormente, se diseñó el PCB, el cual se muestra en figura 6.

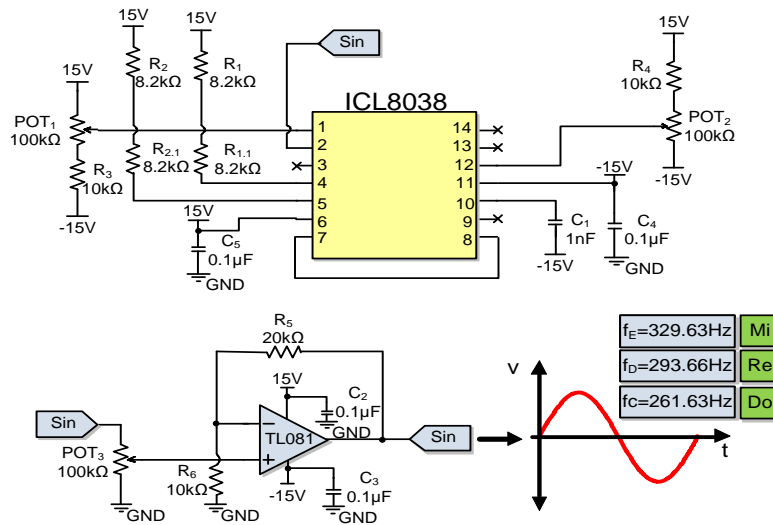


Fuente: Elaboración propia.

Figura 6 Implementación del circuito generador de onda triangular.

## Generador de onda sinusoidal

Para este sistema se generaron tres señales sinusoidales con diferente frecuencia, las cuales se encuentran fijas en función de la frecuencia que las notas musicales C (do), D (re) y E (mi) generan. Se implementó un PCB para cada nota musical utilizando el integrado ICL8038 y cuyo diagrama se muestra en la figura 7.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7 Diagrama electrónico del generador de onda sinusoidal.

De la figura 7, se observa el uso de un amplificador operacional TL081 en configuración no inversora, esta configuración se utilizó para modificar la amplitud de la señal sinusoidal, lo cual a su vez permite modificar el índice de modulación. Las implementaciones de estos tres circuitos se muestran en la figura 8, para la nota C (do), D (re) y E (mi) respectivamente. La amplitud de estas señales puede establecerse de acuerdo con que índice de modulación se desee.



a) Nota C.

b) Nota D.

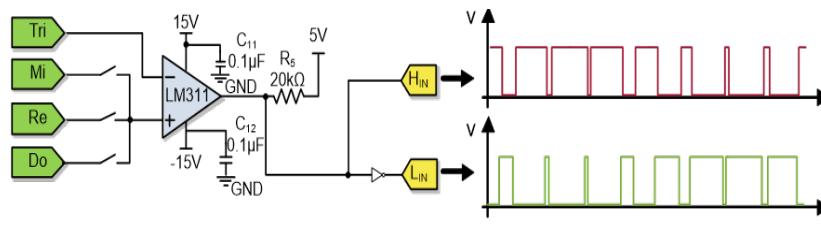
c) Nota E.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8 Implementación de generadores de onda sinusoidales.

## Comparador

Finalmente, para realizar la modulación bipolar se diseñó e implementó un circuito que realiza la comparación entre las señales portadora y moduladora. Dicha comparación se realiza con un amplificador operacional LM311, de esta manera se obtuvo a la salida un tren de pulsos correspondientes a una modulación unipolar a una frecuencia de  $21.5\text{ kHz}$ . Para obtener la señal complementaria se utilizó una compuerta NOT, aunque también es posible utilizar un transistor, sin embargo, se debe agregar un amplificador operacional en configuración seguidor. Con estos elementos es posible generar una secuencia de conmutación que permite controlar los MOSFETs del inversor de medio puente. El diagrama electrónico se muestra en la figura 9. En la tarjeta se colocaron tres botones, con los cuales se puede elegir qué nota se desea escuchar. En la figura 10 se muestra el circuito implementado.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9 Diagrama electrónico para la generación de la modulación bipolar.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10 Implementación de la tarjeta de comparación.

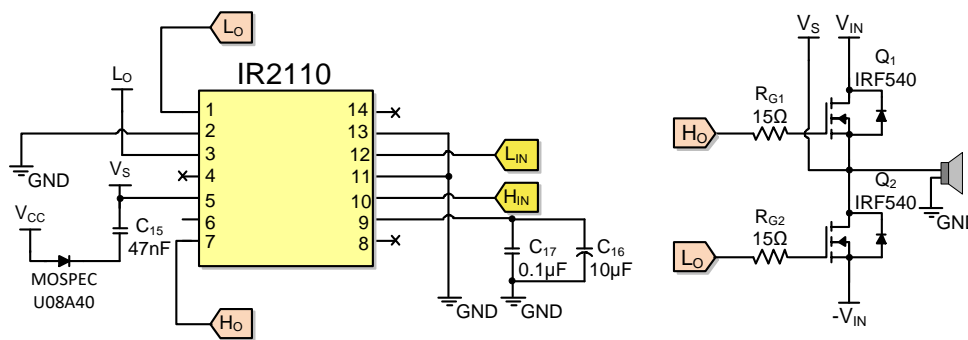
## Inversor medio puente

El inversor medio puente, así como su driver se implementaron en una sola tarjeta para evitar ruido en las señales de disparo. El driver utilizado fue el circuito integrado IR2110, el cual permite la correcta conmutación de dispositivos semiconductores, en este caso de los MOSFETs IRF540. Se utilizó este driver debido a que tiene la característica de enviar un disparo flotado mediante una configuración capacitor-



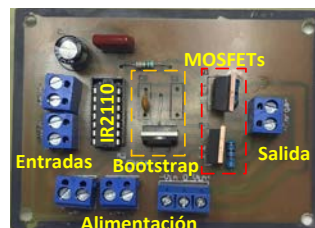
diodo, comúnmente llamada circuito Bootstrap [E. Ballester, 2013]. Con esta configuración se evita el uso de fuentes aisladas, con lo cual el costo de implementación se disminuye bastante. Sin embargo, es importante considerar que el circuito Bootstrap debe diseñarse adecuadamente, de lo contrario, se pueden presentar problemas en las conmutaciones de los dispositivos semiconductores.

Para diseñar correctamente el circuito Bootstrap se debe considerar que el diodo debe ser un ultrarrápido, esto es debido a las señales de alta frecuencia presentes. El capacitor debe ser escogido tomando en cuenta las características del transistor de potencia que se esté utilizando. Para este cálculo se utilizó una calculadora creada por Silicon Labs, con la cual se obtuvo un valor de capacitor de 47 nF. Finalmente, para el diseño del inversor es importante que el circuito Bootstrap este muy cerca del driver IR2110, esto para evitar ruidos e interferencias. En la figura 11, se muestra el diagrama electrónico del inversor implementado. El circuito de la figura 11, fue probado en una protoboard, en donde se utilizó una bocina de 8  $\Omega$  con una potencia máxima de 15 W. En la figura 12, se muestra el PCB que contiene el inversor con su respectivo driver.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11 Diagrama electrónico del inversor de medio puente.

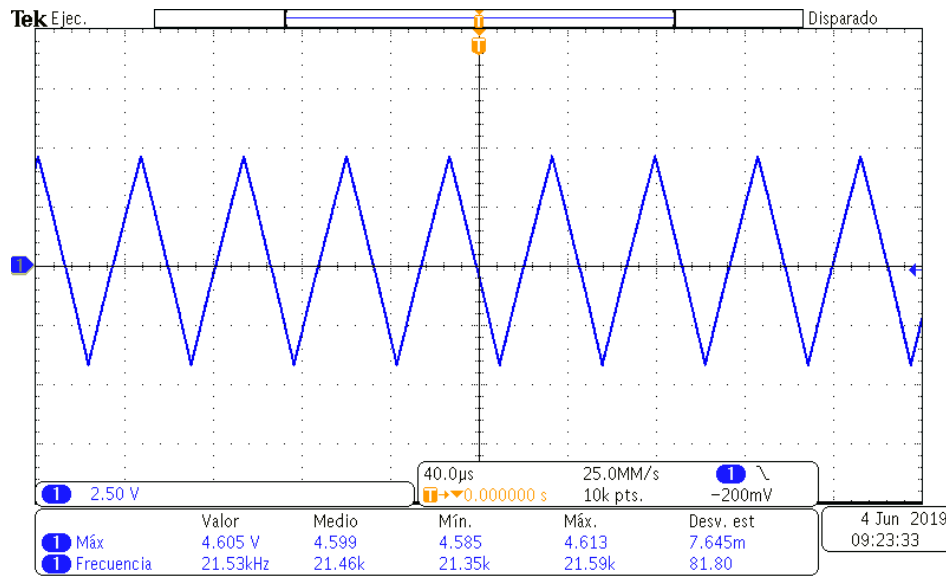


Fuente: Elaboración propia.

Figura 12 Implementación del inversor de medio puente.

### 3. Resultados

Se realizaron pruebas a cada una de las tarjetas que componen el esquema de modulación SPWM, comenzando por el generador de la señal triangular y cuyo resultado se puede apreciar en la figura 13, en donde se puede muestra que la frecuencia obtenida en la señal corresponde aproximadamente con la frecuencia con la que se había diseñado (21.5 kHz).

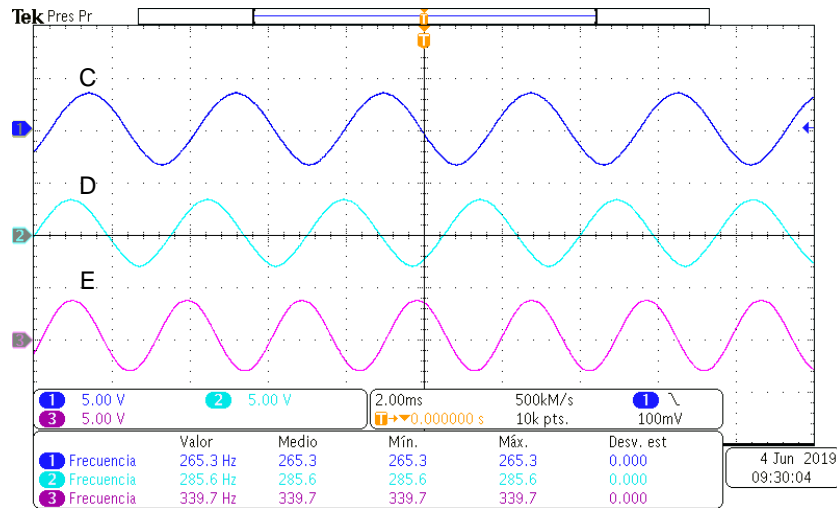


Fuente: Elaboración propia.

Figura 13 Generación de la señal portadora.

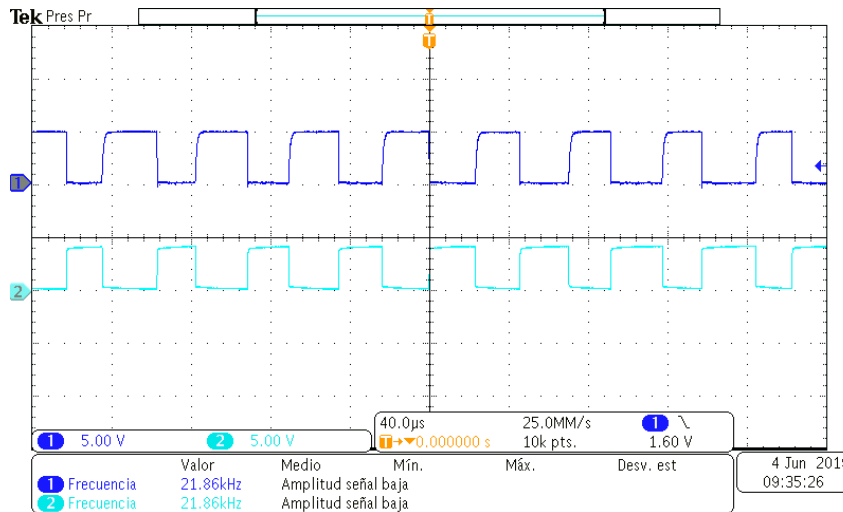
En el sistema temperado las frecuencias correspondientes a las notas C, D y E son 261.625, 293.664 y 329.627 Hz respectivamente [J. Barberá, 1012], [E. Herrera, 1990], en la figura 14 se observan las señales moduladoras obtenidas del diseño mostrado en la figura 7. Se puede observar que las frecuencias generadas varían ligeramente con las frecuencias que se deberían obtener en el sistema temperado; la razón de esto es debido a que no existen resistencias comerciales con el valor exacto para cada frecuencia, por lo que se termina en arreglos serie-paralelo.

Posteriormente se realiza la comparación de la señal moduladora y la portadora y cuyo resultado se muestra en la figura 15, estos disparos son enviados al driver IR2110, cuya función es la de adecuar el disparo de los MOSFETs, agregando un tiempo muerto entre las dos secuencias de disparo.



Fuente: Elaboración propia.

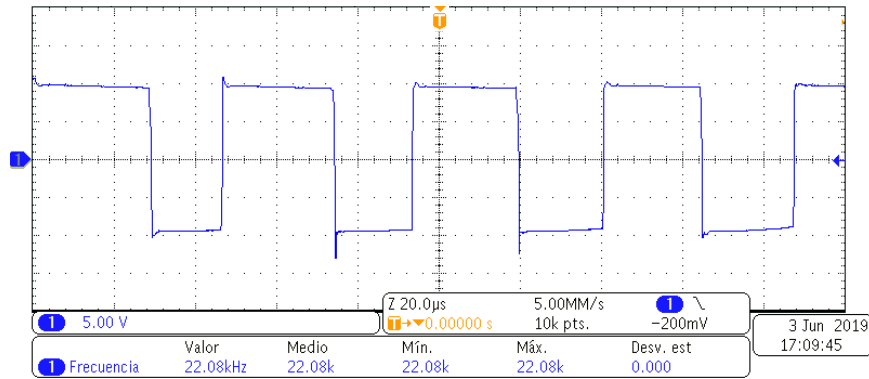
Figura 14 Generación de las señales moduladoras.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15 Resultado de la comparación de la señal portadora y moduladora.

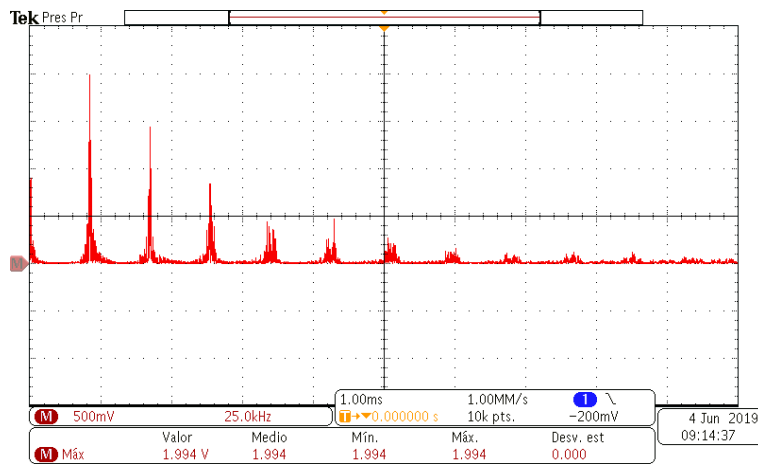
En la figura 16 se puede observar la salida del inversor, el cual fue alimentado con una fuente de laboratorio de 20 V externa, se observa que la frecuencia medida por el osciloscopio es de 22 kHz, que es cercana a la componente de la señal portadora que se diseñó; a dicha frecuencia el oído humano solo es capaz de escuchar las notas musicales sin el contenido armónicos, dejando a un lado la necesidad de implementar un filtro a la salida. Cabe mencionar que aún se está trabajando en la implementación de esta fuente, razón por la cual no se muestran sus características en este artículo.



Fuente: Elaboración propia.

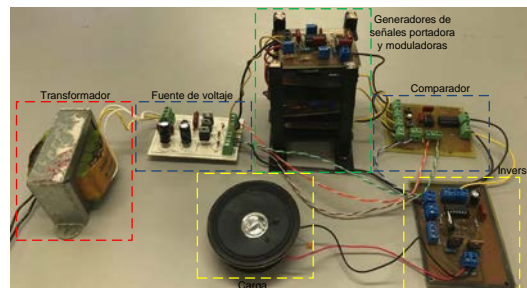
Figura 16 Voltaje de salida del inversor.

En la figura 17 se muestra la transformada rápida de Fourier (FFT) de la salida, se puede observar que el contenido armónico ha sido desplazado a los  $21\text{ kHz}$  aproximadamente, que es una frecuencia auditiva imperceptible para el ser humano. En la figura 18 se observan todas las etapas interconectadas del inversor acústico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17 FFT de la señal de salida.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 18 Etapas que conforman el inversor acústico.

## 4. Discusión

Con el fin de hacer más entendible el funcionamiento de un inversor, en este trabajo se presentó el diseño etapa por etapa de un inversor acústico con fines didácticos. Las frecuencias audibles del inversor son las correspondientes a las notas musicales C, D y E en la cuarta octava, cuyas frecuencias son *261.625*, *293.664* y *329.627 Hz* respectivamente, estas frecuencias fueron obtenidas con el circuito integrado ICL8038, obteniendo unas frecuencias cercanas a las mencionadas anteriormente. Con respecto a la señal portadora, este se diseñó a una frecuencia arriba de los *20 kHz*, esto debido a que esta frecuencia está más allá del rango audible del ser humano, eliminando así la necesidad de implementar un filtro de salida en el inversor; al igual que con las señales moduladoras, se utilizó el circuito integrado ICL8038. Para el control de los interruptores, se utilizó el driver IR2110 en su configuración Bootstrap para conseguir una alimentación aislada de la rama superior del inversor, reduciendo el costo de esta etapa al prescindir de una fuente aislada. Los resultados obtenidos muestran una señal de salida cuyos armónicos más cercanos se encuentran aproximadamente a la frecuencia de la portadora pero que son prácticamente imperceptibles al oído humano.

## 5. Bibliografía y Referencias

- [1] M. H. Rashid, *Electrónica de Potencia*, Tercera ed., McGraw-Hill, 2004.
- [2] N. Mohan, T. M. Undeland y W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, Tercera ed., Mc Graw Hill, 2002.
- [3] D. W. Hart, *Electrónica de Potencia*, Madrid: Pearson Educación, 2001.
- [4] E. Ballester y R. Piqué, *Electrónica de Potencia, Principios Fundamentals y Estructuras Básicas*, Primera ed., Alfaomega, 2013.
- [5] J. Barberá Saiz, *Sistema de Afinación Musical de Proporciones Áurea*, Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [6] E. Herrera, *Teoría musical y armonía moderna vol.1*, Antoni Bosch Editor, S.A, 1990.